

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2016.04.001

逆向工程中回转点云的配准研究

车选林, 张旭, 聂博林

(上海工程技术大学机械工程学院, 上海 201620)

摘要:针对大量回转型点云配准效率不够高的问题,提出一种先利用该类点云的回转半径特征搜索层差,再利用配合角度进行校核计算的方法。对于2块回转形状的点云,其在同一高度的回转半径是近似相同的;另外,如果他们能很好地进行配合,那么存在2条夹着配合断裂线的回转母线。在同一高度上,这2条母线到断裂处弧线所对应的圆心角之和为一个近似的定值。正是利用回转点云的这2个特征,可以快速判断2块点云是否可以配合。在此基础上,为了进一步提高效率,在搜索层差的过程中,只是选取部分点云层进行搜索。文章主要通过三坐标扫描仪获取机械零件的外表面形状数据,然后进行配合验证,实验结果验证了该方法的可行性。该配准方法相对原先方法可明显提高效率。

关键词:逆向工程;回转点云;切片层;配合角度;回转半径

中图分类号:TP391

文献标志码:A

文章编号:1005-2895(2016)04-0001-05

Registration in Reverse Engineering on Revolving Point Clouds

CHE Xuanlin, ZHANG Xu, NIE Bolin

(School of Mechanical Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

Abstract: For the low registration efficiency of a large number of rotary point clouds, the article proposed a registration approach: searching the layer difference between two point clouds using the radius first, and then checking the registration angles. For two rotary point clouds, they had approximative radius at the same height, at the same time, if they could be matched well, there would be two bus bars at opposite side of the break line. At the same height, the adding angle of two points' registration angles was a constant value which could be used to estimate if they could be matched correctly. In order to improve the efficiency, we could merely choose part of the radius for matching. Using the CMM scanners and getting the outer surface point clouds for experimental verification, the algorithm in this article had been proved perfect.

Key words: reverse engineering; revolving point clouds; slice layer; registration angle; turning radius

对于点云的配准,很多学者进行了相关的研究,其中主要方法包括ICP算法和基于点云特征的匹配。ICP算法是一种较为经典的算法,但是它对初值的要求比较高。对于基于点云特征配准的方法,它最初由具有二维特征^[1]的点云进行配准,接着发展到任意三维数据点云的配准。基于点云特征的匹配,往往需要提取点云的边缘^[2]、角点^[3]、轮廓等特征。

对回转型点云进行特征提取^[4-5]与配准,是一种典型的基于轮廓特征的匹配。回转型点云的主要特征包括回转轴^[6-7]、回转半径以及回转圆心角等。Willis和Cooper^[8]提出一种利用贝叶斯算法对回转型点云的边

界线进行估计的算法。后来有学者注意到回转点云的回转半径特点,但是只是初步涉及到回转半径等回转特征,故配准效果还不是特别理想。Son和ALMEIDA等^[9]提出一种充分利用旋转半径和配合角度进行点云匹配的方法。他们主要是针对很多回转型点云的半径特征和配合角度特征进行研究,而有了这2个非常重要的特征,就可以作为判断2块回转型点云配合与否的重要依据。在他们的论文中,根据这2个特征对每块点云进行分层切片,再计算每一层数据点的回转半径和配合角度。同时借助半径和角度配合特点^[10]计算出每个位置的配合误差^[11],从而找出能够很好配

收稿日期:2016-03-14;修回日期:2016-04-25

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51205246);浙江省自然科学基金项目(Y1100073)。

作者简介:车选林(1988),男,安徽合肥人,硕士,主要研究方向为逆向工程。E-mail:1073878061@qq.com

合的点云对,最终完成点云的找寻工作。他们是首次将回转半径与配合圆心角同时很好结合运用的学者。在搜索层差 ξ 的过程中,他们只是简单地使用穷尽搜索的方法。事实上,若选取部分的点云作为搜索对象,并且利用半径配合误差的特征进行搜索,可以提高效率。另外,点云中数据点的跳动误差,对于角度的计算结果的影响比较大,而对于半径的影响则相对较小。因此,在每一层数据点中,计算出的半径值总是比角度值更可靠,故在匹配的过程中,半径特征的贡献量要更大。针对 Son 等算法的不足,本文通过对角度和半径特征的分析,提出一种先匹配半径值,再校核角度值的方法,并且在搜索层差的过程中,采用局部搜索的方法,提高了效率,而且可以完成配合。

1 设备选取及半径、配合角度的计算

1.1 设备选取

三维扫描仪是获取物体外观点云数据的重要仪器,为了提高效率,在数据采集的时候,采用非接触式扫描仪。对于非接触式扫描仪,目前比较常用的仪器测量精度在 $0.04 \sim 0.05$ mm左右,而精度低一点的扫描仪,其测量误差可以达到 0.1 mm左右。本文主要针对的是比较常用的扫描仪,其测量精度为 0.05 mm。

1.2 半径计算

对于进行坐标转换后的数据,需要进行分层处理,根据数据点的密度情况,用平行于 XOY 平面的一系列距离为 d 的平面去截断该点云。对第 n 个和第 $n+1$ 个平面,将它们之间所夹的所有数据点投影到平行于这2个平面且距离为 $d/2$ 的平面上,然后利用最小二乘法拟合出每层数据点的圆心和半径。

1.3 角度计算

1.3.1 点云形状判断

如图1和图2所示,需要对点云沿着竖直方向取若干层(图中水平线代表一层,即 F_1F_2 和 I_1I_2 层),再对每一层上的点云求投影数据点。另外,需要找出每块点云中间位置的分段线 E_1E_2 (即母线),从而计算每一层上母线到两侧最远点所对应的圆心角(配合角度)。在图1中,由于点云规则对称,在选取中心分段线时候,可以选取某层数据点的中间位置作为分段点,从而得到整块点云的分段线。而对于如图2所示的点云,是选择分段线 G_1G_2 还是 H_1H_2 ,就需要首先对点云的形状进行判断了。对于图2中的点云,如果选取了分段线 H_1H_2 ,它并没有通过该点云下半部分的点云层,在计算两侧的配合角度时,必然会出现错误,从而影响配合效果。而分段线 G_1G_2 就是比较好的选择,它

可以保证穿过每个切片层上点云内部,故可以计算出分段点到两侧的配合角度,从而保证后续计算的可行性。在判断点云形状过程中,主要是通过判断部分层中数据点数目来判断整个点云形状的走势,从而在宽度合适的段选取其水平中心位置作为分段点。

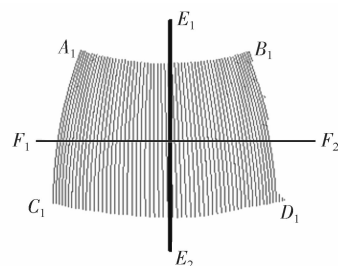


图1 上下宽度规则型点云

Figure 1 Point cloud with normal width

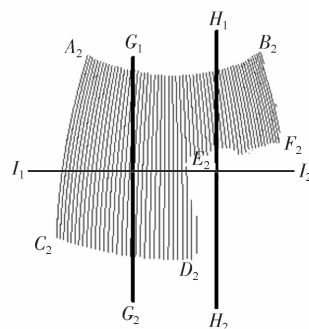


图2 上宽下窄型点云

Figure 2 Point cloud with unnormal width

1.3.2 点云配合角度的计算

图3为某层上点云的投影点,在计算配合角度时,首先需要找出点云在该平面上的分段点 C 点,然后计算被该分段点分割的2部分点云所对应的圆心角 α_1 和 α_2 。其中, A 点为左端与分段点所成圆心角最大时所对应的数据点,而 B 点为右端与分段点所成圆心角最大的数据点。

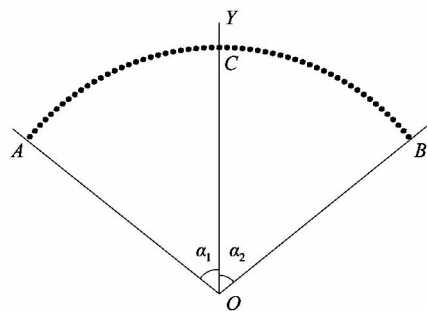


图3 某层点云上的配合角度

Figure 3 Registration angle calculating on one layer

2 利用回转半径与配合角度对点云进行配合

对于2块分别分成 n_1 和 n_2 层的点云,它们每一层的回转半径和配合角度数据如下:

1) 由2块点云可以得到其2组半径值 R_{1i} ($i=1, 2, 3\cdots, n_1$)和 R_{2j} ($j=1, 2, 3\cdots, n_2$)。其中, R_{1i} 和 R_{2j} 分别为点云1和点云2在第 i 与 j 层上拟合出的半径。

2) 另外,可以对应得到4组角度值 α_{1i} 和 α_{2i} ($i=1, 2, 3\cdots, n_1$), α_{3j} 和 α_{4j} ($j=1, 2, 3\cdots, n_2$)。其中, α_{1i} 和 α_{2i} 分别为第1块点云的 i 层上的配合角度;同样, α_{3j} 和 α_{4j} 为另一块点云第 j 层上的配合角度。

利用1)和2)中几组数据,即可以通过半径特征进行计算,从而搜索到2块点云的层差 ξ ,再利用配合角度特征最终判断它们在对应的层上是否可以配合。

2.1 分析半径与角度在计算过程中所产生的误差

如图4所示,形成圆环形状的数据点为实际数据点所处的位置,中间上方位置跳动的点为一个产生径向跳动的数据点,假设在无误差时,所有数据点拟合出圆的半径值为 R_0 。若中间上方位置的数据点沿着半径方向的跳动值为 Δd ,此时产生的拟合半径误差最大。根据误差公式 $d_i^2 = (X_i - M)^2 + (Y_i - N)^2$,要保证所有的数据点拟合出的误差平方 d_i^2 达到最小,设变化后的半径为 R_1 ,则 $R_1 < R_0 + \Delta d$ 。式中, X_i 和 Y_i 为该平面上投影点在 X 和 Y 轴上坐标值; M 和 N 为拟合圆心在 X 和 Y 轴上坐标值。在图5中,圆环形状的数据点为实际点所处的位置,最左侧数据点为端点处沿着圆弧方向跳动的一个数据点(相同的跳动距离时,产生的角度变化最大),假设跳动距离为 Δd ,即旋转的弦长为 Δd ,此时产生的角度误差为最大,此时产生的角度为 θ_1 (单块点云产生的误差):

$$\theta_1 = 2\arcsin \frac{\Delta d}{2R_1} \quad (1)$$



图4 某层上中间数据点产生跳动

Figure 4 One fault point in middle on a layer



图5 某层上端点(左侧)数据点产生跳动

Figure 5 One fault point at endpoint on a layer

另外,如图6所示为 P_1, P_2 2块点云(左侧线条包含的为 P_1 点云,右侧虚线包含的为 P_2 点云),他们正好在如图位置正确配合。图6中水平线为2块点云的一条共同水平切片层。 D 点为切片层与 P_1, P_2 2块点云配合处边界线交点位置。在 D 处,由于测量原因,经常会出现所测数据点无法靠近断裂线的情况,且假设单侧点云产生的误差角度为 θ_2 。除此之外,碎片在配合处可能有细小碎末产生,也会造成断裂处数据点配合角度产生误差 θ_3 ,则总的角度误差 θ 最大可能有: $\theta = 2\theta_1 + 2\theta_2 + 2\theta_3$ 。很明显,角度配合结果外界影响的因素较多,而半径受到的影响较小,所以选择半径进行搜索。

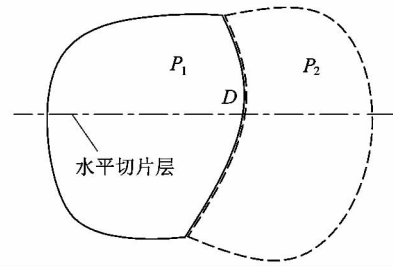


图6 P_1, P_2 2块点云配合图

Figure 6 Two point clouds of P_1 and P_2

2.2 配合的搜索过程

如图7所示,线条1和线条2为2个点云的截面曲线(为了方便比较,特意将线条2向右平移一段距离)。图7中,水平方向值表示点云每一层的半径,竖直方向为点云的层数。若 R_{1i} 和 R_{2j} 分别是线条1和线条2的2条曲线分别位于 i 和 j 层上的半径。如果线条1和线条2在图中 $h_1 h_2$ 段之间位置能够正好地配合,则在其间的所有层上 $|R_{1i} - R_{2j}|$ 之和的均值 Δ 为最小,即:

$$\Delta = \frac{1}{n} \sum_{i,j \in \Omega} |R_{1i} - R_{2j}|$$

式中: n 为公共部分的层数; Ω 为公共层集合。

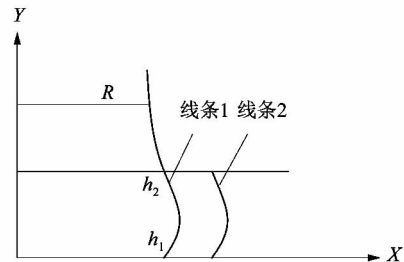


图7 2块点云的截面曲线

Figure 7 Section curves of two point clouds

在图7中,2块点云在图中 h_1h_2 段可以实现配合,但在很多情况下, h_1h_2 段可能比较长,其所包含的层数会比较多,所以在搜索过程中,如果利用配合段中所有层进行计算,会导致计算量较大,计算效率下降,因此本文采用部分层进行计算。

1) 选取配合段 h_1h_2 的部分层作为基准配合半径序列。线条2的 h_1h_2 段选取一部分连续的点云层 L_2 (共40层),并作为基准配合半径序列,与第1块点云各个层上半径进行搜索配合。

2) 利用 L_2 与线条1中某些层进行配合,得到1个 Δ 值。用 L_2 段的半径值与线条1中第 k 层到第 $k+39$ 层上半径值分别相减,得到对应的 Δ 值。

3) 上下各移动 L_2 若干层,与线条1中层配合,得到18个 Δ 值。如果将 L_2 段的第1层与线条1中的第 $k+1, k+2, \dots, k+9$ 分别作为开始配合层计算 Δ 值,可以得到9个 Δ_i 值;同样将 L_2 段的最后1层与线条1中的第 $k-1, k-2, \dots, k-9$ 分别作为最终配合层计算 Δ 值,又可以得到9个 Δ_i 值,这样总共得到18个 Δ 值。

4) 确定层差 ξ 值,如果在搜索过程中对于19个 Δ 值满足以下2个条件:①中间的1个 Δ 值满足 $\Delta \leq \varepsilon$ (ε 为一个较小的正数);② $\Delta_i (i=1, 2, \dots, 18, 19)$ 满足大致为从大到小再到大的变化规律。

如图8所示,19个 Δ_i 的变化趋势为由大到小再到大,当某次搜索时,如果同时满足①和②2个条件,就认为2块点云的 i 和 j 层处于同一竖直高度,同时可以计算出他们之间的层差 ξ 值。

5) 为保证搜索过程中不会出现搜索死角,对于2块点云,选取其中层数较少的点云上下各40层作为搜索基准层,2次与另一块点云中各层的半径值进行搜索配合,从而得出2块点云的层差 ξ 。

6) 利用角度辅助验证2块点云是否可以配合。当2块点云层差为 ξ 时,移动其中一块点云 ξ 层,则2块点云在某个范围内可以配合。计算该区间每一层上的 $\alpha_{1i} + \alpha_{3j}, \alpha_{1i} + \alpha_{4j}, \alpha_{2i} + \alpha_{3j}$ 和 $\alpha_{2i} + \alpha_{4j}$ 值,得到4组角度值,并对每组角度值求方差,将方差值从小到大排序为 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ 和 σ_4 。当满足条件 $\sigma_1 \leq (\sigma_2/3)$ 时,认为这2块点云能够配合,反之,不能配合。

3 实例分析

为了验证本文中算法的可行性,取21块实物碎片,采用精确度为0.05 mm的DUO/SOLO型光笔测量仪,并测得的21块点云,用第1块点云与其它点云进行配合验证。其中,21块点云的数据特征如表1所示。

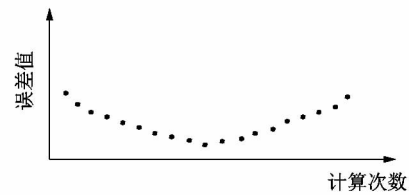


图8 2块点云段每次匹配的19个误差值

Figure 8 19 deviations of two point clouds in one matching process

表1 21块点云数据信息

Table 1 Data information of 21 point clouds

点云序号	数据点数目/个	点云序号	数据点数目/个
1	45 529	12	23 751
2	22 883	13	14 589
3	24 758	14	24 688
4	13 600	15	25 766
5	22 805	16	14 601
6	24 118	17	12 252
7	13 408	18	25 779
8	12 917	19	15 664
9	24 868	20	23 081
10	13 877	21	13 198
11	20 123		

利用vs2010软件,编辑相应的程序,并对点云进行获取与处理。为了进一步检验改进算法的可行性,本文还采用测量精度为0.10 mm和测量精度为0.01 mm的另外2组实验数据进行配准计算。在采用原始的配合方法时,配合时间与配合效果如表2所示。

表2 不同测量精度下原始的配准时间与效果

Table 2 Registration time and result of diverse measuring accuracy in old algorithm

测量精度/mm	完成配合所需时间/s	配合判断
0.01	15.119	能
0.05	15.185	能
0.10	15.178	部分点云无法配合

采用本文算法,所得结果如表3所示。

表3 不同测量精度下配准时间与效果

Table 3 Registration time and result of diverse measuring accuracy

测量精度/mm	完成配合所需时间/s	配合判断
0.01	13.388	能
0.05	13.375	能
0.10	13.441	能

通过表2和表3每个表格各组之间的对比,在配合次数为20次时,本算法可以节省约2 s(约1/6的时

(下转第10页)

- [6] BEJAN A. Entropy generation through heat and fluid flow[M]. New York: Wiley-Interscience Publication, 1982: 89 – 190.
- [7] BEJAN A. Entropy generation minimization: the method of thermodynamic optimization of finite-size systems and finite-time processes[M]. New York: Wiley-Interscience Publication, 1996: 77 – 101.
- [8] WU Shuangying, CHEN Sujun, LI Yourong, et al. Numerical investigation of turbulent flow, heat transfer and entropy generation in helical coiled tube with larger curvature ratio[J]. Heat and mass transfer, 2008, 45(5): 569 – 578.
- [9] 李雅侠, 董国先, 吴剑华, 等. 反应釜内螺旋半圆管夹套内流体的湍流换热性能及熵产分析[J]. 过程工程学报, 2013, 13(4): 555 – 561.
- [10] AHADI M, ABBASSI A. Entropy generation analysis of laminar forced convection through uniformly heated helical coils considering effects of high length and heat flux and temperature dependence of thermophysical properties[J]. Energy, 2015, 82: 322 – 332.
- [11] XIA Guodong, LIU Xianfei. An investigation of two-phase flow pressure drop in helical rectangular channel [J]. International communications in heat and mass transfer, 2014, 54: 33 – 41.
- [12] PAWAR S S, SUNNAPWAR V K. Experimental and CFD investigation of convective heat transfer in helically coiled tube heat exchanger[J]. Chemical engineering research and design, 2014, 92(11): 2294 – 2312.
- [13] 王翠华, 刘胜举, 吴剑华. 三角形螺旋流道充分发展流体的流动性能[J]. 化工学报, 2014, 65(1): 100 – 107.
- [14] WEBB R L, ECKERT E R G. Application of rough surfaces to heat exchanger design[J]. International journal of heat and mass transfer, 1972, 15(9): 1647 – 1658.
- [15] WEBB R L. Performance evolution criteria for use of enhanced heat transfer surfaces in heat exchanger design[J]. International journal of heat and mass Transfer, 1981, 24: 715 – 726.
- [16] ZHAI Yuling, XIA Guodong, LIU Xianfei, et al. Heat transfer in the microchannels with fan shaped reentrant cavities and different ribs based on field synergy principle and entropy generation analysis[J]. International journal of heat and mass transfer, 2014, 68: 224 – 233.
- [17] 翟玉玲, 夏国栋, 刘献飞, 等. 复杂结构微通道热沉液体强化传热过程的热力学分析[J]. 化工学报, 2014, 65(9): 3403 – 3409.
- [18] WANG Yingshuang, ZHOU Bing, LIU Zhichun, et al. Numerical study and performance analyses of the mini-channel with discrete double-inclined ribs [J]. International journal of heat and mass transfer, 2014, 78: 498 – 505.

(上接第4页)

间), 而当配合次数达到上百次且点云中点数大量增加时, 可以节省更多的时间, 故本文改进的算法可以提高配合效率。

4 结语

本文利用改进的配准方法提高了回转点云的配准效率, 而且经过很多实例验证。在这些验证实例中, 该方法效率的确有一定程度的提高, 而且比较可靠, 故在配准数目较大的物体(如回转型文物碎片配准)时, 其优势就比较明显。本文只是针对回转形状的点云进行研究的, 对于非回转点云或者回转特征不是特别明显的小块点云, 该方法就无法完成配合, 故还需要进一步研究, 从而可以实现对其他类型点云的有效配准。

参考文献:

- [1] BESL P J, MCKAY N D. A method for registration of 3-D shapes[J]. IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence, 1992, 14(2): 239 – 256.
- [2] RUSINKIEWICZ S, LEVOY M. Efficient variants of the ICP algorithm [C]//Proceedings of 3rd International Conference on 3D Digital Imaging and Modeling (3DIM 2001). Quebec City, Canada: IEEE Computer Society, 2001: 145 – 152.
- [3] HUANG Qixing, FLORY S, GELFAND N, et al. Reassembling fractured objects by geometric matching[J]. ACM transactions on graphics, 2006, 25(3): 569 – 578.
- [4] 杨雪娇. 点云的边界提取及角点检测算法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2010: 34 – 45.
- [5] 刘德平, 刘晓宇, 陈建军. 逆向工程中回转面特征参数的提取[J]. 塑性工程学报, 2008, 15(1): 178 – 180.
- [6] MARA H. Orientation of rotationally symmetrical archaeological finds by 3D shape estimation [D]. Wien: Technische Universität Wien, 2006: 14 – 16.
- [7] POTTSMANN H, RANDRUP T. Rotational and helical surface approximation for reverse engineering[J]. Computing, 1998, 60(4): 307 – 322.
- [8] WILLIS A R, COOPER D B. Bayesian assembly of 3d axially symmetric shapes from fragments[C]//Proceeding of the 2004 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Washington: IEEE Computer Society, 2004: 82 – 89.
- [9] SON K, ALMEIDA E B, COOPER D B. Axially symmetric 3D pots configuration system using axis of symmetry and break curve [C]//Proceedings of the 2013 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Washington, DC, USA: IEEE Computer Society, 2013: 257 – 264.
- [10] GOLDBERG D, MALON C, BERN M. A global approach to automatic solution of jigsaw puzzles[J]. Computational geometry, 2004, 28(2/3): 165 – 174.
- [11] DA GAMA LEITAO H C, STOLFI J. A multiscale method for the reassembly of two-Dimensional fragmented objects [J]. IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence, 2002, 24(9): 1239 – 1251.